



HAL
open science

Caractérisation par peigne de fréquences d'un résonateur en anneau intégré

Thomas Perriguet, Hugues Guillet de Chatellus, Goulc'Hen Loas, Quentin Wilmart, Marc Vallet, Mehdi Alouini, Marco Romanelli

► To cite this version:

Thomas Perriguet, Hugues Guillet de Chatellus, Goulc'Hen Loas, Quentin Wilmart, Marc Vallet, et al.. Caractérisation par peigne de fréquences d'un résonateur en anneau intégré. JCOM 2025 - Journée du Club Optique Micro-ondes, Jun 2025, Toulouse, France. 2025. <hal-05318352v2>

HAL Id: hal-05318352

<https://hal.science/hal-05318352v2>

Submitted on 9 Feb 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 - Attribution - Non-commercial use - ShareAlike - International License

Caractérisation par peigne de fréquences d'un résonateur en anneau intégré

Thomas Perriguy^{1*}, Hugues Guillet de Chatellus¹, Goulc'Hen Loas¹, Quentin Wilmart², Marc Vallet¹, Mehdi Alouini¹, Marco Romanelli¹

1. Université de Rennes, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, F-35000 Rennes, France

2. Université Grenoble Alpes, CEA, LETI, F-38000 Grenoble, France

*thomas.perriguy@univ-rennes.fr

La génération de signaux hyperfréquences à haute pureté spectrale est essentielle pour de nombreuses applications, comme dans le domaine des radars et des télécommunications [1]. Les oscillateurs optoélectroniques (OEO) ont été largement étudiés au fil des années comme dispositifs performants pour la génération optique de signaux hyperfréquences [2]. Les OEO utilisent généralement une longue fibre optique (plusieurs kilomètres) afin de fournir un retard important et ainsi augmenter le facteur de qualité de l'oscillateur. Toutefois, les systèmes modernes exigent de plus en plus des solutions compactes, intégrées sur puces photoniques et à faible consommation.

Dans ce contexte, les résonateurs en anneau intégrés, utilisés à la fois comme ligne à retard et filtre photonique, apparaissent comme d'excellentes alternatives aux fibres optiques. Les propriétés spectrales du signal hyperfréquence généré, en particulier sa fréquence et sa pureté spectrale, sont directement liées à l'intervalle spectral libre (ISL) et au facteur de qualité du résonateur [3]. Il est donc essentiel de caractériser ces résonateurs avec précision.

Dans ce travail, nous présentons une caractérisation optique détaillée d'un résonateur en anneau en nitrure de silicium (SiN), réalisé au CEA-LETI (Figure 1). La fonction de transfert en intensité du résonateur est, dans un premier temps, analysée à l'aide de la fonction *Component Analyzer* d'un analyseur de spectre optique à haute résolution (BOSA, Aragon Photonics) (Figure 2). Cette mesure donne un ISL de 9 GHz et une largeur à mi-hauteur (FWHM) de 138 MHz, correspondant à un facteur de qualité de $1,4 \times 10^6$. Toutefois, cette technique ne fournit que la fonction de transmission en intensité du résonateur mais ne donne aucune information sur sa réponse en phase, qui renseigne sur la qualité optimale du couplage optique au résonateur.

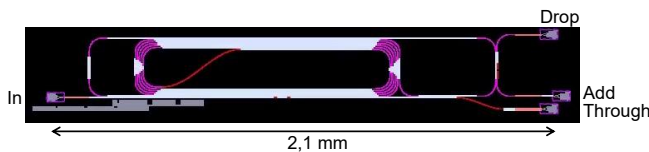


Figure 1. Résonateur en anneau intégré en SiN

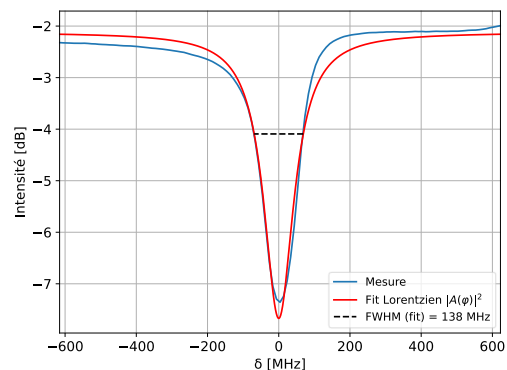


Figure 2. Fonction de transmission en intensité du résonateur

Pour une caractérisation complète, nous avons mis en place une méthode basée sur l'exploitation d'un peigne de fréquences optique. Celui-ci est généré par une boucle à décalage de fréquence injectée par un laser monochromatique [4]. Cette technique permet de contrôler très simplement l'espacement du peigne et donc la résolution de la mesure. Le peigne de fréquences est injecté dans le résonateur puis recombinaison à la sortie avec le laser d'injection de la boucle à décalage de fréquence. La transformée

de Fourier du signal de battement détecté sur une photodiode placée à la sortie « Through » de l'anneau donne alors accès à la fonction de transmission en amplitude et en phase du résonateur (Figure 3). En extrayant l'amplitude et la phase de chaque dent du peigne (Figure 4), et en suivant les notations de Yariv [5-6], nous retrouvons non seulement les paramètres déterminés précédemment (FWHM de 123 MHz en intensité et facteur de qualité de $1,6 \times 10^6$), mais déterminons également le régime de couplage (ici sur-couplage), ainsi que les facteurs de qualité intrinsèque (4×10^6) et externe ($2,6 \times 10^6$) du résonateur. Notre technique est particulièrement bien adaptée aux caractéristiques spectrales des résonateurs intégrés pour lesquels la méthode de « Ringdown » [7] est difficile à mettre en œuvre.

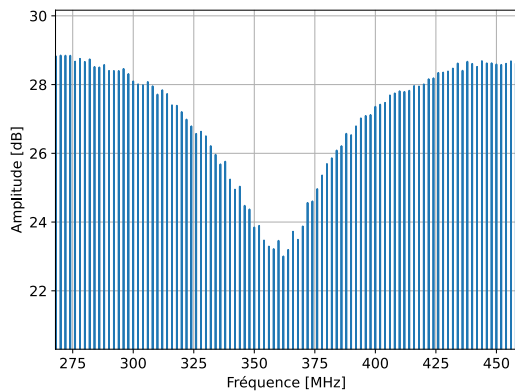


Figure 3. Transmission du résonateur mesurée sur le peigne hétérodyne (l'espacement des dents du peigne est de 2 MHz)

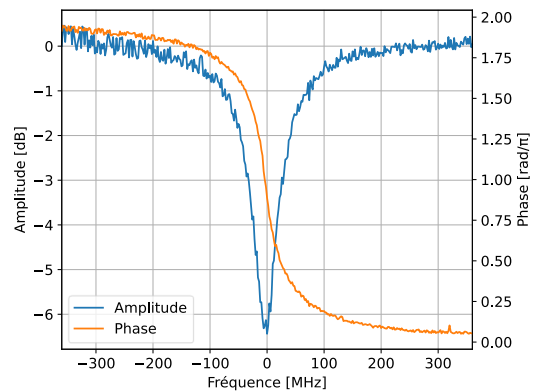


Figure 4. Fonction de transmission en amplitude et en phase du résonateur, extraite à partir des dents du peigne hétérodyne

Références :

- [1] F. Zou *et al.*, « Optoelectronic oscillator for 5G wireless networks and beyond », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 54, n° 42, p. 423002, 2021, doi: 10.1088/1361-6463/ac13f2.
- [2] T. Hao, W. Li, N. Zhu, et M. Li, « Perspectives on optoelectronic oscillators », *APL Photonics*, vol. 8, n° 2, p. 020901, 2023, doi: 10.1063/5.0134289.
- [3] P. T. Do, C. Alonso-Ramos, X. Le Roux, I. Ledoux, B. Journet, et E. Cassan, « Wideband tunable microwave signal generation in a silicon-micro-ring-based optoelectronic oscillator », *Sci. Rep.*, vol. 10, n° 1, p. 6982, avr. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-63414-9.
- [4] V. Durán, C. Schnébelin, et H. G. de Chatellus, « Coherent multi-heterodyne spectroscopy using acousto-optic frequency combs », *Opt. Express*, vol. 26, n° 11, p. 13800-13809, mai 2018, doi: 10.1364/OE.26.013800.
- [5] A. Yariv, « Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides », *Electron. Lett.*, vol. 36, n° 4, p. 321-322, févr. 2000, doi: 10.1049/el:20000340.
- [6] Z. Abdallah, Y. G. Boucher, A. Fernandez, S. Balac, et O. Llopis, « Radio frequency spectral characterization and model parameters extraction of high Q optical resonators », *Sci. Rep.*, vol. 6, n° 1, p. 27208, juin 2016, doi: 10.1038/srep27208.
- [7] Y. Dumeige, S. Trebaol, L. Ghişa, T. K. N. Nguyễn, H. Tavernier, et P. Féron, « Determination of coupling regime of high-Q resonators and optical gain of highly selective amplifiers », *JOSA B*, vol. 25, n° 12, p. 2073-2080, déc. 2008, doi: 10.1364/JOSAB.25.002073.

Remerciements :

Nous remercions l'Agence Nationale de la Recherche (22-PEEL-0008 (PEPR Électronique - OROR)), la Région Bretagne, FEDER and Rennes Métropole (CPER PhotBreizh) pour leur support financier.

Caractérisation par boucle à décalage de fréquence d'un résonateur en anneau intégré

Thomas Perriguet¹, Hugues Guillet de Chatellus¹, Goulc'Hen Loas¹, Quentin Wilmart², Marc Vallet¹, Mehdi Alouini¹, Marco Romanelli¹

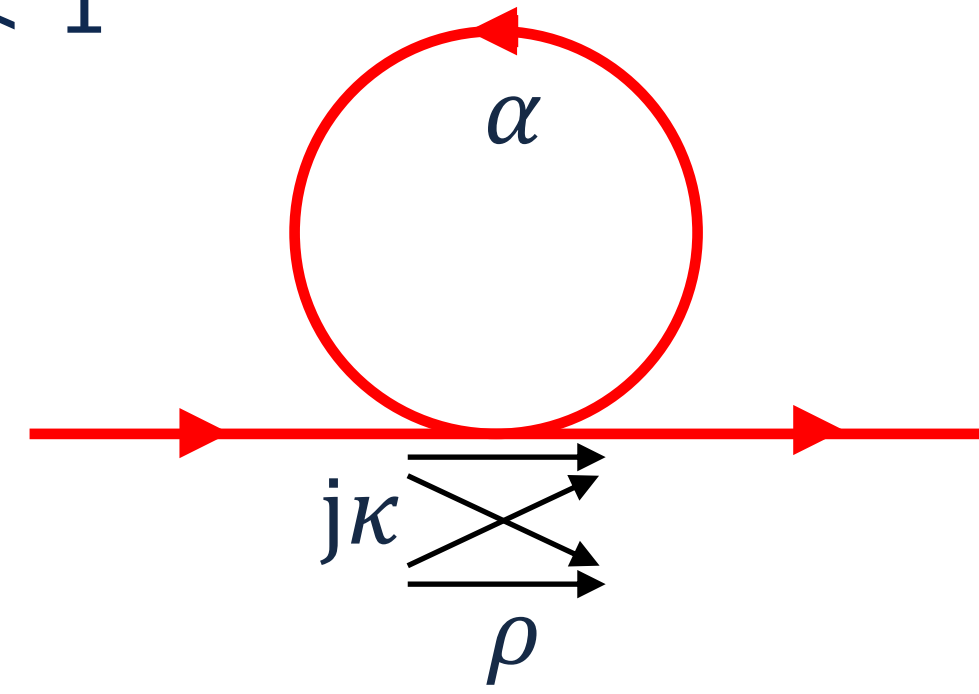
1. Université de Rennes, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, F-35000 Rennes, France
2. Université Grenoble Alpes, CEA, LETI, F-38000 Grenoble, France

Introduction

Les résonateurs en anneau constituent une brique de base vers l'intégration d'oscillateurs optoélectronique (OEO) sur puce photonique, car ils assurent à la fois les fonctions de ligne à retard et de filtre optique. Les propriétés spectrales du signal généré par l'OEO, en particulier la fréquence et la pureté spectrale, sont directement liées à l'intervalle spectral libre (ISL) et au facteur de qualité Q du résonateur [1]. Une caractérisation précise de ces résonateurs est donc essentielle. Nous comparons une méthode simple de mesure directe de l'ISL $\Delta\nu$, de la largeur de résonance $\Delta f_{1/2}$ et Q à une méthode par boucle à décalage de fréquence permettant, de surcroît, d'identifier le régime de couplage.

Théorie

- Transmission complexe [2] : $A(\varphi) = \frac{\rho - \alpha e^{-i\varphi}}{1 - \alpha \rho e^{-i\varphi}} = |A(\varphi)| e^{i\theta(\varphi)}$
- Coefficient de circulation interne : $0 < \alpha < 1$
- Coefficient de transmission : $0 < \rho < 1$
- Coefficient de couplage : $|\kappa|^2 = 1 - |\rho|^2$
- Déphasage sur un aller-retour : φ



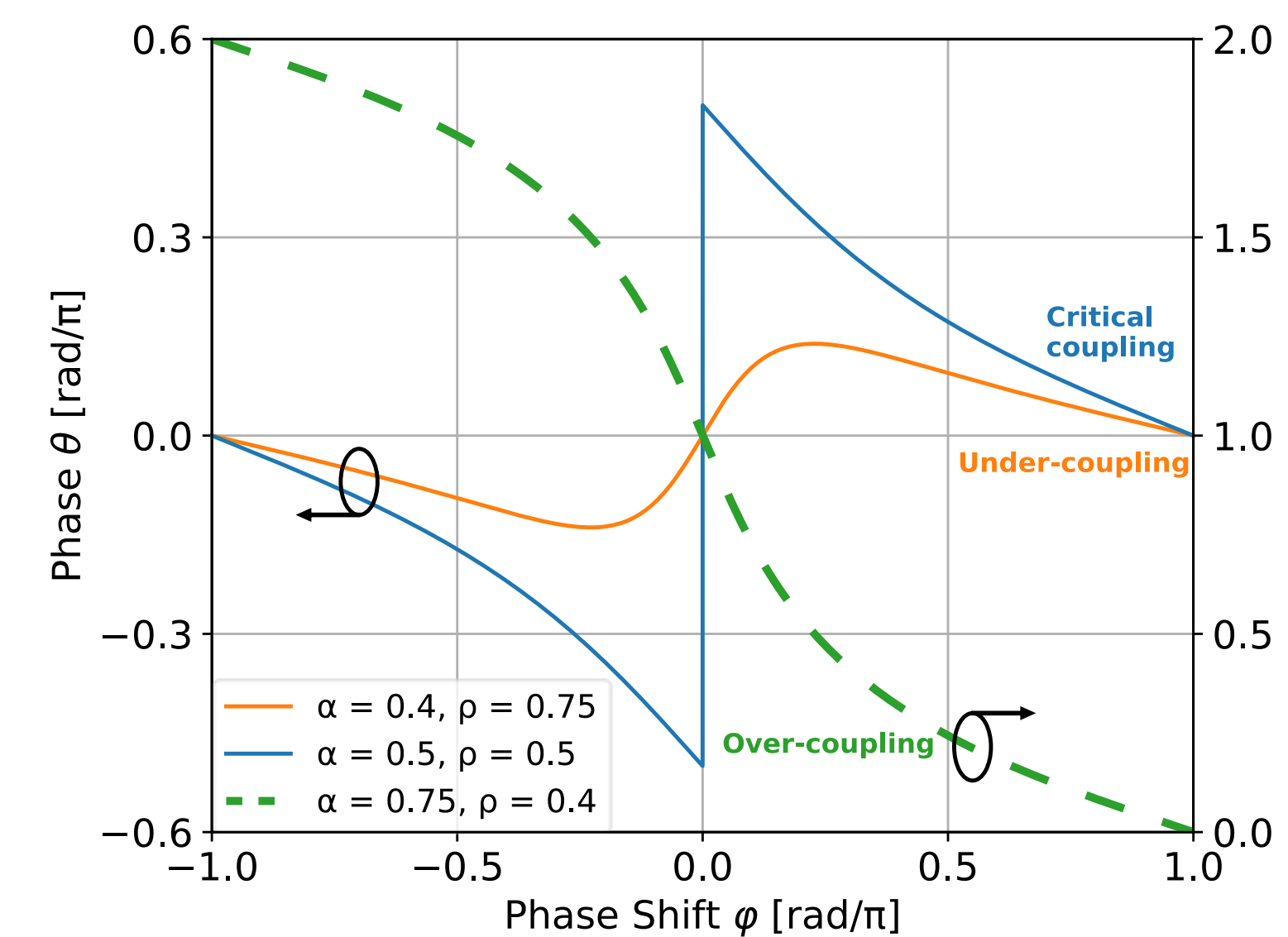
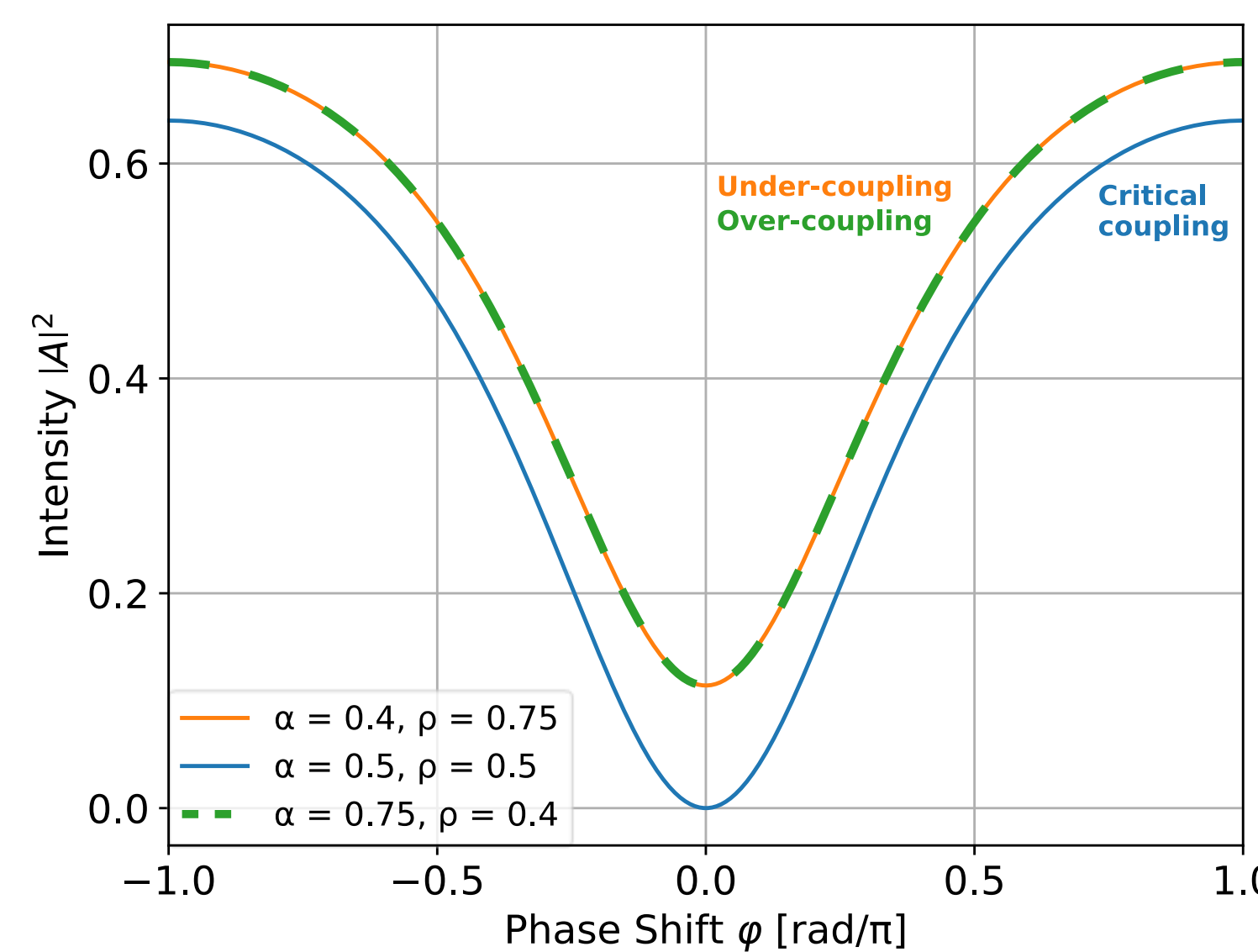
- Facteurs de qualité intrinsèque Q_0 et externe Q_e dépendent de α et ρ

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_e} \rightarrow Q = \frac{v_0}{\Delta f_{1/2}}$$

$$Q_0 = -\frac{2\pi v_0 \tau_L}{2 \ln(\alpha)} \quad Q_e = -\frac{2\pi v_0 \tau_L}{2 \ln(\rho)}$$

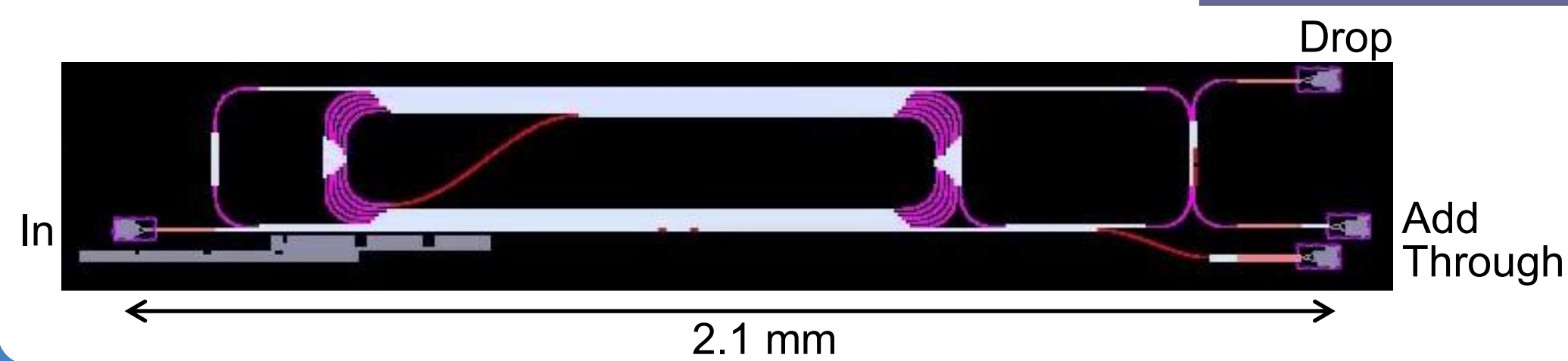
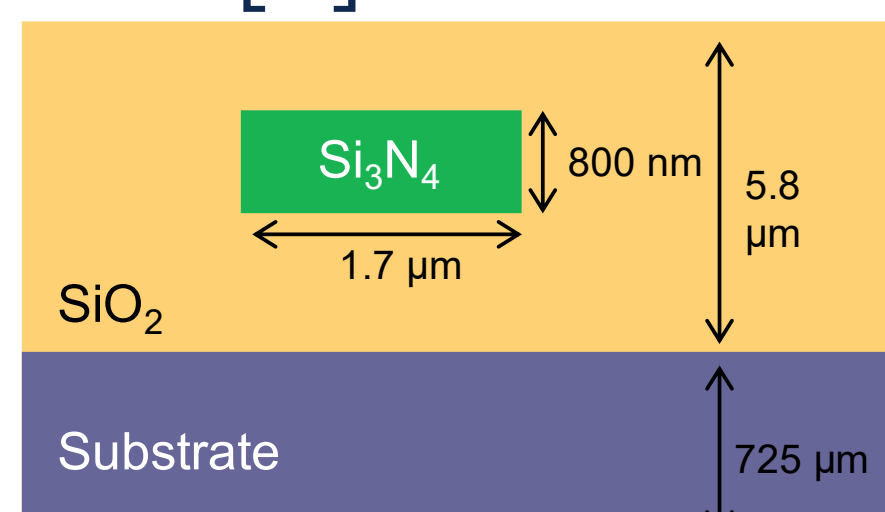
- Réponses en intensité $|A(\varphi)|^2$ (forme lorentzienne) et en phase $\theta(\varphi)$ du résonateur dépendent de α et ρ [3]

$$|A(\varphi)|^2 = \frac{\alpha^2 + \rho^2 - 2\alpha\rho \cos(\varphi)}{1 + \alpha^2\rho^2 - 2\alpha\rho \cos(\varphi)} \quad \theta(\varphi) = \arctan\left(\frac{\alpha \sin(\varphi)}{\rho - \alpha \cos(\varphi)}\right) - \arctan\left(\frac{\alpha\rho \sin(\varphi)}{1 - \alpha\rho \cos(\varphi)}\right) + K_1(\varphi) + K_2$$



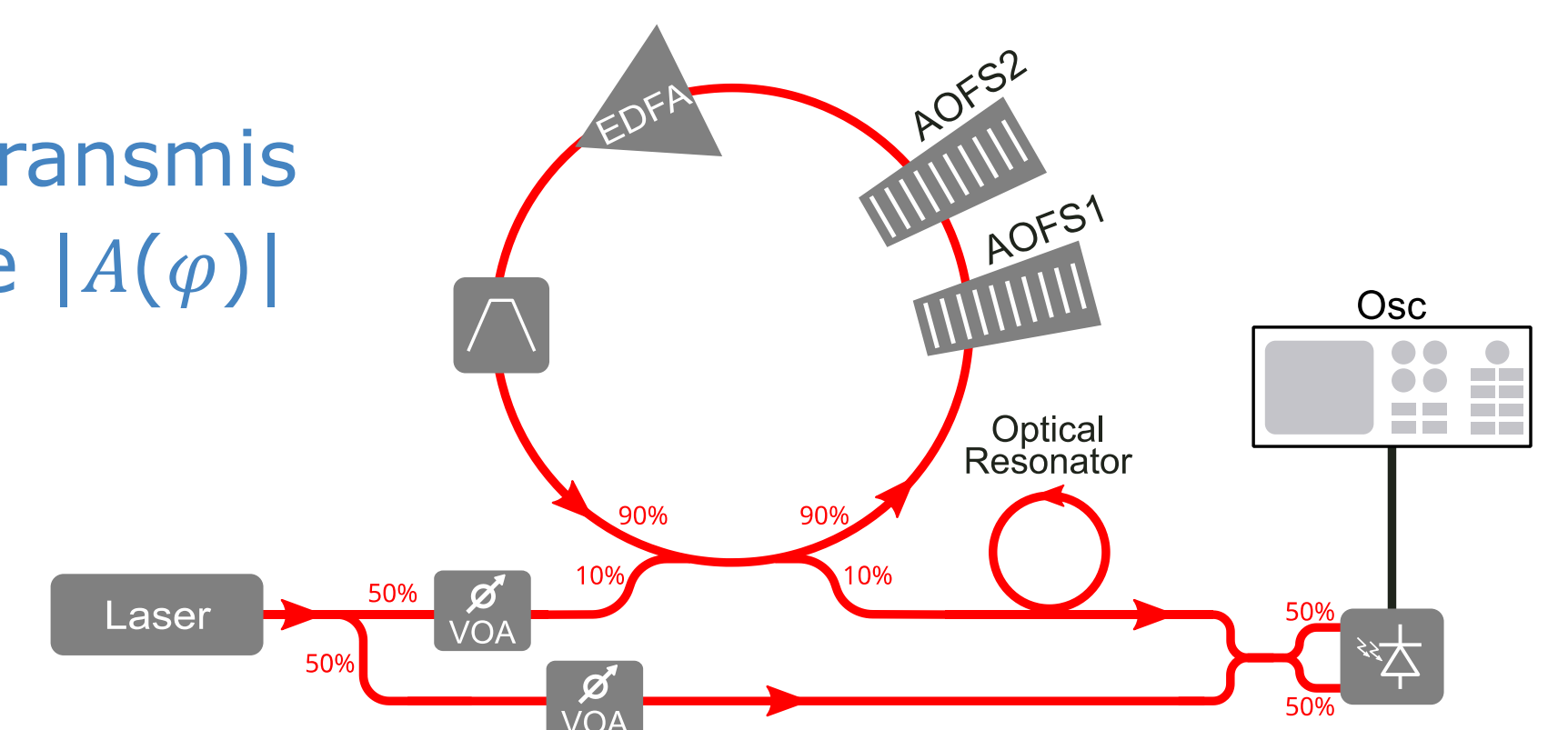
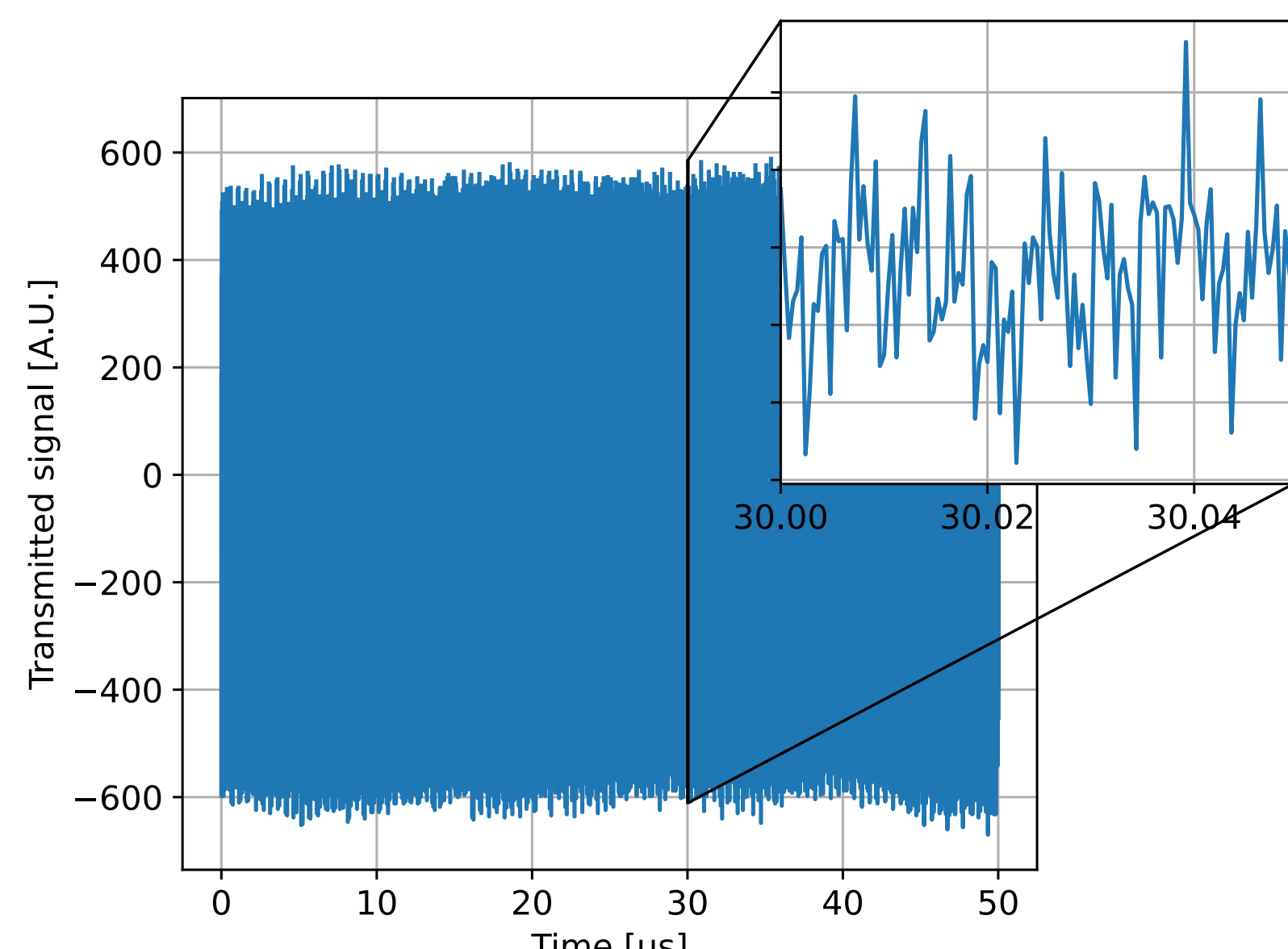
Résonateur intégré

- Conception et fabrication au CEA-LETI [4]
- Si₃N₄ sur SiO₂
- Guide d'épaisseur 800 nm
- Fort confinement
- ISL de 9 GHz

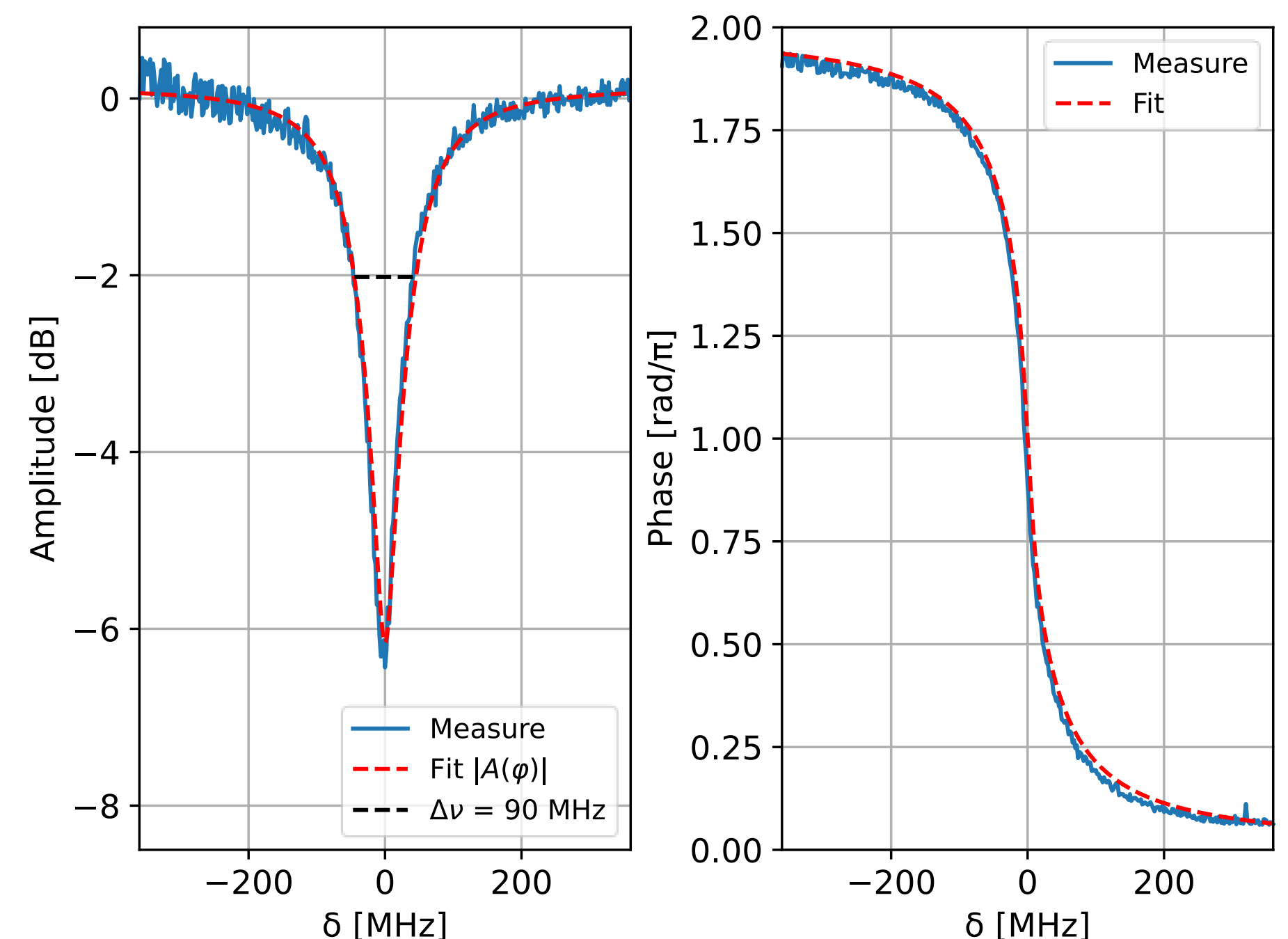


Méthode par boucle à décalage de fréquence [5]

- Peigne de fréquences, formé à partir d'une boucle à décalage de fréquence, injecté dans le résonateur
 - 2 acousto-optiques (AOFS) imposent l'écart en fréquence entre les dents du peigne ($\Delta f = 2$ MHz)
- Transformée de Fourier (FFT) du signal transmis
 - Fonction de transmission en amplitude $|A(\varphi)|$ et phase $\theta(\varphi)$ du résonateur

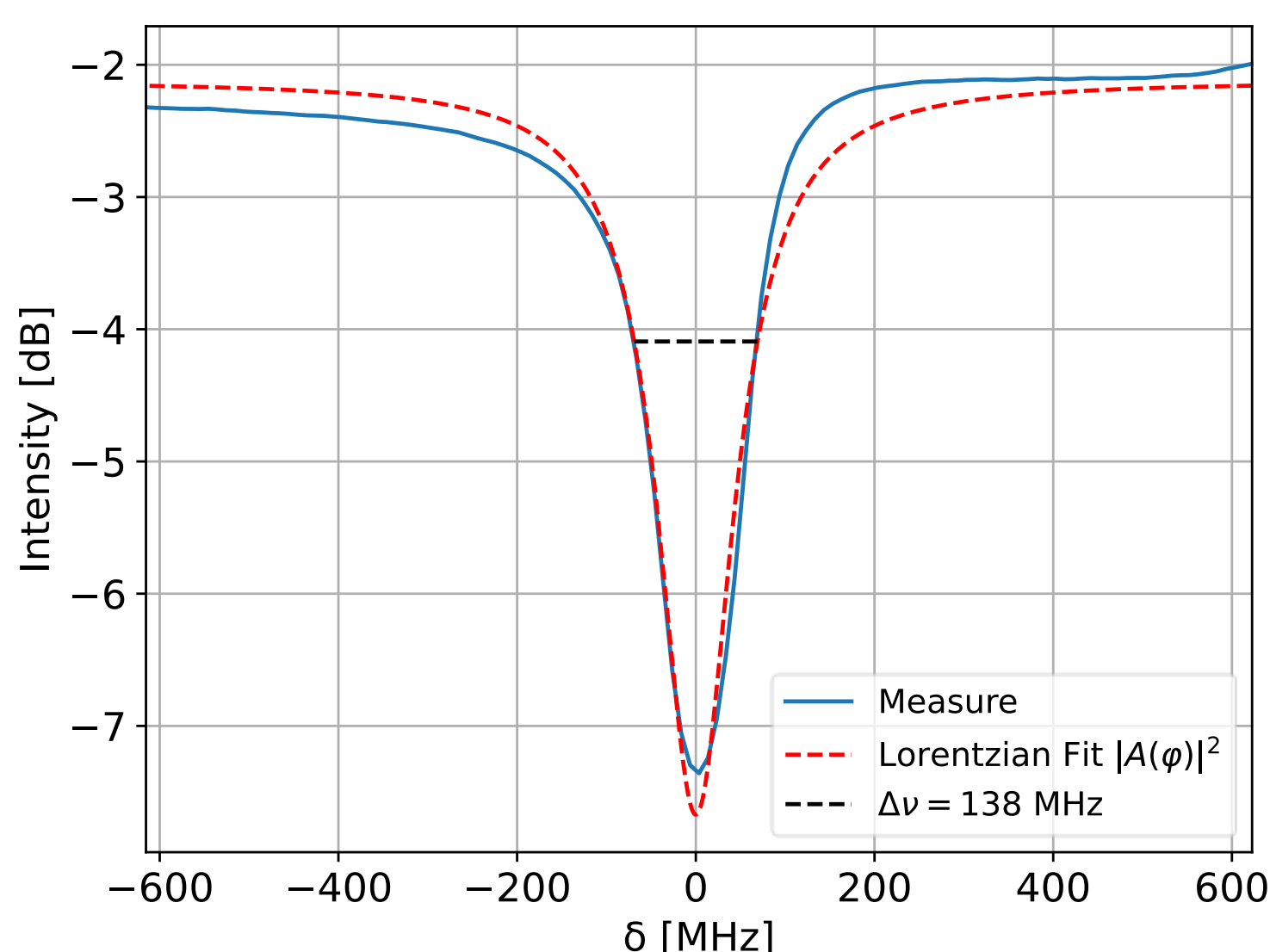


- Détermination de α et ρ donc du régime de couplage et de Q_0 et Q_e



Méthode par balayage optique

- Fréquence laser balaye lentement les résonances
- Exploitation d'un Analyseur de Spectre Optique haute résolution (10 MHz, BOSA Aragon Photonics)
- Seule l'intensité transmise $|A(\varphi)|^2$ est mesurable (pas d'information sur la phase)
- Méthode simple mais Q_0 et Q_e ne peuvent pas être différenciés



Résultats et Conclusions

	Balayage optique	Boucle à décalage de fréquence
ISL (GHz)	9,06	
$\Delta\nu A(\varphi) ^2$ (MHz)	138 ± 5	123 ± 5
Q (.10 ⁶)	1,4	1,57
Q ₀ (.10 ⁶)		3,98
Q _e (.10 ⁶)		2,58
Régime de couplage		Sur-couplage

- Les deux méthodes donnent la même largeur de résonance
- Balayage optique :
 - Simple à mettre en œuvre
 - Permet une mesure directe de l'ISL, $\Delta\nu$ et Q
- Boucle à décalage de fréquence :
 - Plus complexe à mettre en place
 - Donne en plus accès au régime de couplage, Q_0 et Q_e
 - Mesure plus précise (acquisition courte : 50 μ s)